

10 Resultados dos Ensaios com Geogrelhas Danificadas

10.1. Introdução

O dano mecânico de um material geossintético pode ser definido pelas transformações estruturais resultantes dos esforços ocorridos durante o manuseio e instalação do material e a compactação do solo sobrejacente.

Esses danos, sofridos no processo de instalação, podem reduzir significativamente as propriedades mecânicas do geossintético. O fator de redução por dano mecânico é usualmente determinado através da razão entre a resistência obtida em amostras do material intacto e a resistência do material danificado (ou exumado imediatamente após a instalação e compactação)

O dano mecânico é usualmente avaliado pelo fator de redução (f_d), definido como:

$$f_d = \frac{\text{resistência da amostra intacta}}{\text{resistência da amostra danificada}} \quad (98)$$

O fator de dano mecânico permite estimar a redução da resistência característica resultante dos danos físicos que a geogrelha sofre durante os processos de instalação e compactação do solo sobrejacente.

Os ensaios reportados no presente Capítulo tiveram por finalidade a avaliação da influência do dano mecânico nas propriedades mecânicas das geogrelhas e no mecanismo de interação com o solo. O programa experimental constou de ensaios de tração simples, arrancamento e cisalhamento direto em amostras previamente danificadas.

Dois tipos diferentes de dano foram induzidos nos 3 tipos de geogrelhas utilizados no presente trabalho: o dano natural, obtido a partir de procedimentos de instalação e compactação e o dano artificial, obtido a partir da ruptura física e artificialmente imposta de elementos da malha.

O dano natural procurou reproduzir as condições de campo e foi obtido a partir da simulação no laboratório dos procedimentos de instalação e compactação. Foram utilizados 3 tipos de solo (silte argiloso, areia e brita) e 2

métodos diferentes de compactação, com o objetivo de investigar o efeito da granulometria e da energia de compactação no processo de danificação das geogrelhas.

O dano artificial consistiu na ruptura física de elementos da malha. Diferentes configurações de dano foram ensaiadas, com o objetivo de avaliar as alterações de rigidez e resistência de amostras que tenham sofrido danos intensos, com a ruptura de elementos da malha.

Os ensaios de tração simples foram executados em amostras danificadas natural e artificialmente. Neste tipo de ensaio, são avaliadas apenas as propriedades inerentes às geogrelhas.

Os ensaios de arrancamento e de cisalhamento direto foram executados em amostras danificadas artificialmente, com o objetivo de avaliar o efeito de eventuais danos no mecanismo de interação solo-geogrelha.

Como, no presente trabalho, foram executados diferentes tipos de ensaios para avaliação dos efeitos do dano, optou-se por definir diferentes fatores de redução. Foram levados em consideração o tipo de dano (natural ou artificial) e o tipo de ensaio utilizado para avaliar a resistência das amostras (tração simples, arrancamento ou cisalhamento direto). A Tabela 38 apresenta um resumo dos diferentes fatores de redução que serão apresentados no presente Capítulo.

Tabela 38 - Definição dos Fatores de Redução

Tipo de Dano	Tipo de Ensaio	Fator de Redução
Natural	Tração Simples	f_1
Artificial	Tração Simples	f_2
	Arrancamento	f_3
	Cisalhamento Direto	f_4

10.2.

Ensaio de Tração Simples: Amostras Danificadas Naturalmente

Estes ensaios foram realizados em amostras intactas e em amostras submetidas ao processo de compactação no laboratório.

Foram utilizados 3 tipos de solo: silte argiloso, areia e brita. O silte argiloso e a areia foram caracterizados no Capítulo 5 e utilizados nos ensaios de arrancamento, cisalhamento direto e triaxiais. O material de granulometria mais grossa (brita) foi utilizado com o objetivo de provocar uma compactação mais agressiva e, conseqüentemente, majorar os danos à estrutura das geogrelhas.

Este material constitui-se de fragmentos de rocha basáltica, apresentando um diâmetro médio de 20mm (Figura 180).



Figura 180 - Material Granular Utilizado no Programa Experimental

Para a compactação do solo sobre a geogrelha, foram utilizados 2 métodos distintos: um soquete manual, que aplica uma energia igual à do ensaio Proctor Modificado ($2,63\text{J}/\text{cm}^2$) e um compactador dinâmico que aplica uma energia quatro vezes superior ($10,52\text{J}/\text{cm}^2$). Detalhes sobre o procedimento de ensaio estão apresentados no Capítulo 6.

Terminada a simulação do dano através da compactação, as geogrelhas foram cuidadosamente exumadas para evitar danos adicionais. Após a exumação, as amostras foram analisadas através de critérios de inspeção visual e através de uma análise microscópica. As lesões visíveis foram registradas e estão classificadas na Tabela 39. No registro das lesões visíveis foi adotado o mesmo critério de classificação utilizado por Azambuja (1994):

- Corte: orifício com forma alongada
- Contusão: forte distorção da estrutura da geogrelha, sem orifícios.
- Furo: orifício com forma aproximadamente circular

A análise qualitativa do dano demonstrou que, no caso do solo silto-argiloso, nenhuma das geogrelhas ensaiadas apresentava lesões visíveis. Para os solos de granulometria mais grosseira (areia e brita), uma maior energia de compactação (dinâmica) causa maiores danos, independente da geogrelha

ensaiada. De acordo com Azambuja (1994), para solos granulares uniformes e com grãos angulosos, a energia de compactação assume um papel importante na incidência do dano mecânico.

Tabela 39 - Inspeção Visual do Dano Ocorrido Durante a Compactação em Laboratório

Nº	Geogrelha	Solo	Compactação	Comentários
1	MacGrid	silte argiloso	soquete manual	sem dano
2	Malha Metálica			sem dano
3	ParaGrid			sem dano
4	MacGrid	areia	soquete manual	2 contusões e 4 cortes
5	Malha Metálica			2 contusões e 1 furo
6	ParaGrid			sem dano
7	MacGrid	brita	soquete manual	9 cortes
8	Malha Metálica			15 contusões e 12 furos
9	ParaGrid			7 contusões
10	MacGrid	silte argiloso	dinâmica	sem dano
11	Malha Metálica			sem dano
12	ParaGrid			sem dano
13	MacGrid	areia	dinâmica	sem dano
14	Malha Metálica			5 contusões e 2 furos
15	ParaGrid			3 contusões
16	MacGrid	brita	dinâmica	14 cortes e 2 furos
17	Malha Metálica			9 contusões, 19 furos e 1 corte
18	ParaGrid			11 contusões

Para um mesmo solo e mesmo método de compactação, a geogrelha MacGrid demonstrou-se a mais susceptível ao dano, seguida da Malha Metálica. A geogrelha ParaGrid exibe elevada resistência aos danos causados pela compactação, apresentando apenas contusões, em ensaios com a brita. As Figuras 181 e 182 exibem fotos das geogrelhas danificadas.

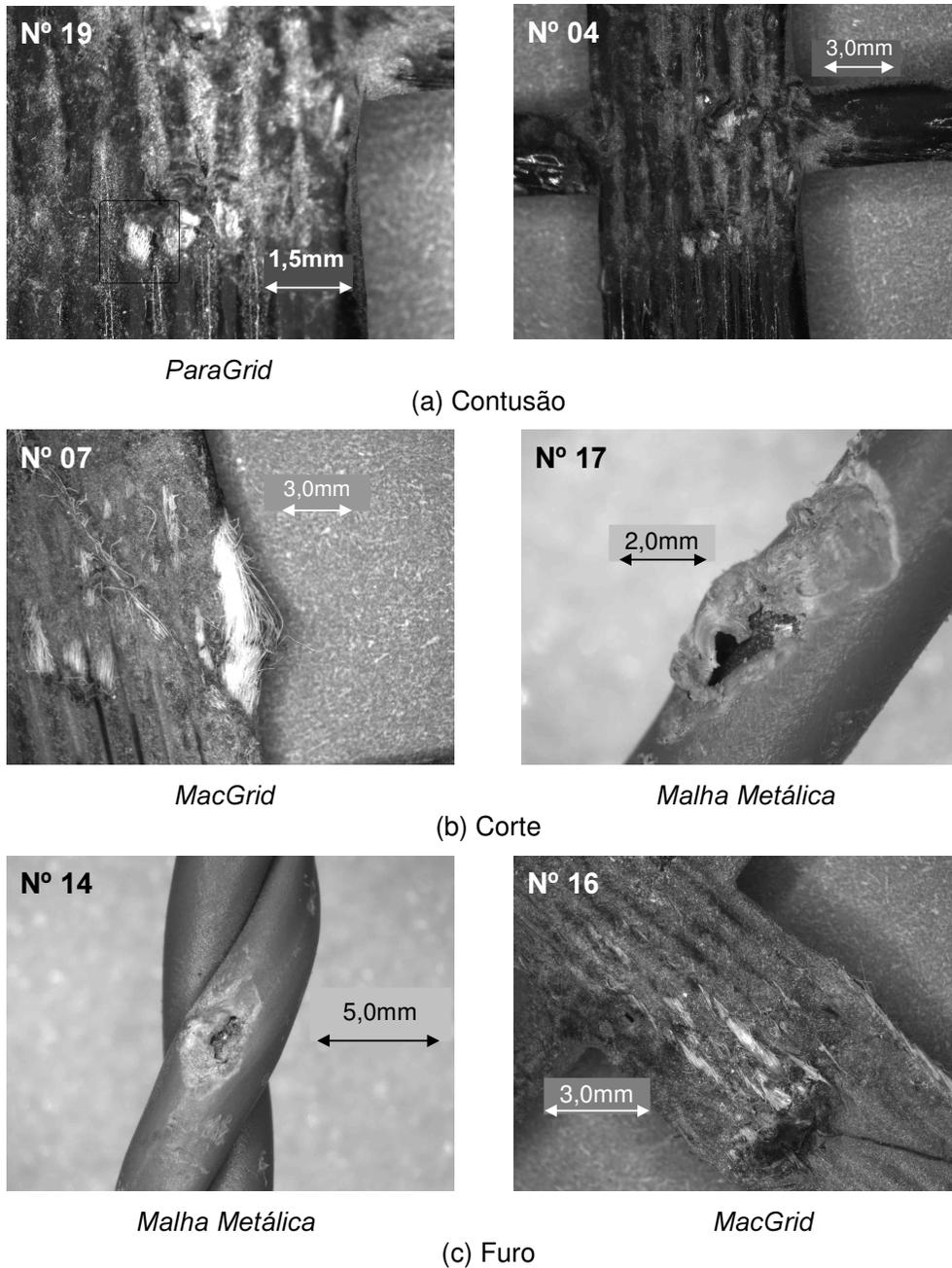
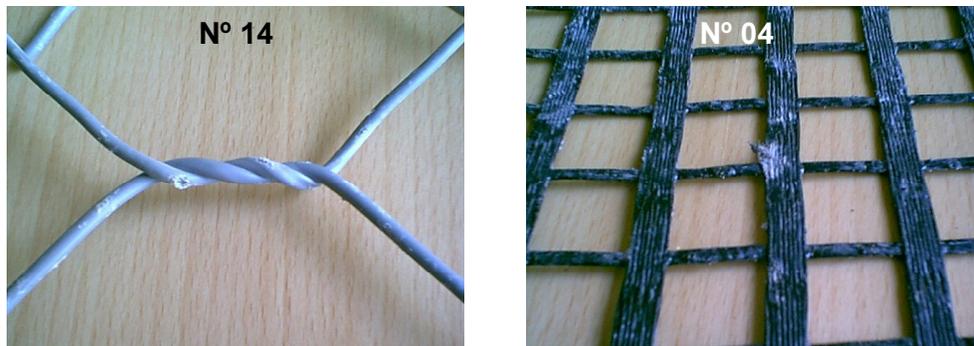


Figura 181 - Inspeção Microscópica do Dano Natural Após a Compactação no Laboratório

É interessante notar, que no caso da Malha Metálica, observou-se apenas a ruptura da proteção de PVC, não ocorrendo dano visível nos arames que compõem a malha. A ruptura da proteção de PVC, apesar de não provocar perda de resistência a curto prazo, torna a malha mais susceptível a ataques de agentes químicos e biológicos, podendo ocasionar uma perda acentuada de resistência a longo prazo.



(a) furo – Malha Metálica

(b) contusão - MacGrid

Figura 182 - Inspeção Visual do Dano Natural Após a Compactação no Laboratório

Após a inspeção visual e microscópica, as amostras foram submetidas a ensaios de tração simples para a obtenção do fator de redução $f_d=f_1$. No caso das geogrelhas poliméricas (MacGrid e ParaGrid), as amostras exumadas foram submetidas a ensaios de tração de faixa larga, segundo a norma ISO10319. As amostras ensaiadas possuíam 200mm de largura e 250mm de comprimento, como comentado no Capítulo 6. Ressalta-se que o comprimento refere-se à distância inicial entre as garras.

Para a Malha Metálica, devido à grande abertura dos orifícios, os ensaios de tração simples foram executados com amostras maiores de 900mm de largura e 600mm de comprimento.

A Tabela 40 apresenta os resultados dos ensaios de tração simples realizados com os 3 tipos de geogrelha, juntamente com os fatores de redução f_1 obtidos. Os ensaios de tração simples em amostras intactas foram executados no mesmo equipamento e foram apresentados no Capítulo 5. Na condição intacta, a geogrelha MacGrid apresenta uma resistência à tração simples de 92,4kN/m, a ParaGrid possui uma resistência de 63,5kN/m e a Malha Metálica de 28,2kN/m.

No caso da geogrelha MacGrid, os resultados da Tabela 40 indicam que não houve perda de resistência em todos os casos de compactação realizada com argila e também na compactação com o soquete manual (energia Proctor Modificado) e material arenoso. Para os ensaios com pedregulho, observou-se uma perda significativa de resistência.

Tabela 40 - Ensaios de Tração Simples em Amostras Danificadas Naturalmente: Fatores de Redução

Nº	Geogrelha	Solo	Compactação	Resistência à Tração (kN/m)	f_d
01	MacGrid	silte argiloso	soquete manual	92,1	1,00
02	Malha Metálica			28,2	1,00
03	ParaGrid			63,7	1,00
04	MacGrid	areia	soquete manual	92,0	1,00
05	Malha Metálica			28,1	1,00
06	ParaGrid			63,6	1,00
07	MacGrid	brita	soquete manual	70,1	1,30
08	Malha Metálica			27,7	1,02
09	ParaGrid			63,8	1,00
10	MacGrid	silte argiloso	dinâmica	92,0	1,00
11	Malha Metálica			28,1	1,00
12	ParaGrid			63,6	1,00
13	MacGrid	areia	dinâmica	86,5	1,07
14	Malha Metálica			28,0	1,00
15	ParaGrid			63,7	1,00
16	MacGrid	brita	dinâmica	63,5	1,45
17	Malha Metálica			27,5	1,02
18	ParaGrid			63,6	1,00

No caso da Malha Metálica e da geogrelha ParaGrid, nenhum dos ensaios realizados apresentou uma perda de resistência considerável devido ao dano provocado pela compactação. As lesões da geogrelha ParaGrid restringiram-se apenas à cobertura de polietileno, não afetando o núcleo de poliéster. A ruptura da proteção de PVC da Malha Metálica, assim como as lesões superficiais da geogrelha ParaGrid, não foram suficientes para provocar uma perda de resistência a curto prazo. Apenas a geogrelha MacGrid apresentou perda de resistência significativa causada pela compactação com pedregulho. A inspeção visual demonstrou que, em alguns casos, ocorreu a ruptura dos filamentos de poliéster do núcleo, além da ruptura da proteção de PVC.

Cabe ressaltar que o núcleo define as características mecânicas das geogrelhas. A função do revestimento é proteger o núcleo contra danos de instalação e durante a vida útil da obra reforçada. É de se esperar então, que

uma lesão nos filamentos que compõem o núcleo provoque uma perda acentuada de resistência.

No entanto, a ruptura do revestimento pode causar perda de resistência a longo prazo, tendo em vista que os filamentos do núcleo ficam expostos à ação de agentes químicos e biológicos durante a vida útil da obra.

Allen (1991) classifica as condições de instalação dos geossintéticos de acordo com a maior ou menor agressividade do ambiente. Essas condições são classificadas em diferentes níveis de “severidade do meio”. Os níveis de severidade são definidos em função da espessura da camada de solo sobrejacente, da forma dos grãos e do tipo de equipamento de compactação.

De acordo com a classificação sugerida na Tabela 11 (Capítulo 4), a severidade do meio classifica-se como baixa, para os solos arenoso e silto-argiloso, e moderada, para o solo de granulometria mais grossa. Cabe ressaltar, que ambos os métodos de compactação utilizados na presente campanha experimental reproduzem equipamentos leves, com baixa energia de compactação no campo.

Da mesma forma, pode-se definir o conceito de “capacidade de sobrevivência” do geossintético (Christopher e Holtz, 1984). Este termo é usado para definir a resistência à destruição que um geossintético possui diante dos esforços induzidos durante a construção e o tempo de serviço. Rainey e Barksdale (1993) dividem as geogrelhas em 2 grupos: as geogrelhas flexíveis (poliéster) e as geogrelhas rígidas (polietileno e polipropileno). De acordo com estes autores, as geogrelhas flexíveis (poliéster), com resistência à tração superior a 55kN/m, como é o caso das geogrelhas MacGrid e ParaGrid, possuem uma alta capacidade de sobrevivência Tabela 10 (Capítulo 4).

A Malha Metálica, por sua vez, é constituída por arames de aço e não está classificada na Tabela 10 (Capítulo 4). No entanto, geogrelhas com resistência à tração inferior a 50kN/m possuem capacidade moderada de sobrevivência, independente de serem rígidas ou flexíveis.

A partir das definições de severidade do meio e capacidade de sobrevivência, Azambuja (1994) apresenta faixas de fatores de dano para geogrelhas (Tabela 41). Verifica-se que, no caso de geogrelhas flexíveis, com alta capacidade de sobrevivência, o fator de redução varia entre 1,05 a 1,15 quando a geogrelha encontra-se em um meio de baixa severidade e 1,15 a 1,30, em um meio de severidade moderada. Geogrelhas com moderada capacidade de sobrevivência, como é o caso da Malha Metálica, apresentam fatores de redução variando de 1,05 a 1,15, em meios de baixa severidade.

Os fatores de redução obtidos com os ensaios de simulação de dano encontram-se dentro dos limites apresentados na Tabela 41, com exceção da compactação dinâmica executada com a geogrelha MacGrid imersa em brita. Neste caso, o fator de redução foi de 1,45. De acordo com a Tabela 41, fatores de redução desta magnitude correspondem a meios de alta severidade.

Tabela 41 - Faixa de Fatores de Dano para Geogrelhas (Azambuja, 1994)

Geossintético	Capacidade de sobrevivência	Severidade do Meio			
		Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
Grelha flexível revest. acrílico	Moderada	1,10 – 1,20	1,20 – 1,40	NR	NR
	Alta	1,10 – 1,15	1,20 – 1,40	1,50 – NR	NR
Grelha flexível revest. de PVC	Moderada	1,05 – 1,15	1,15 – 1,30	1,40 – 1,60	NR
	Alta	1,05 – 1,15	1,15 – 1,30	1,40 – 1,60	1,50 – 2,00
Grelha rígida de polipropileno	Moderada	1,05 – 1,15	1,05 – 1,20	1,30 – 1,45	NR
Grelha rígida de polietileno	Moderada	1,05 – 1,15	1,10 – 1,40	1,20 – 1,50	1,30 – 1,60
	Alta	1,04 – 1,10	1,05 – 1,20	1,15 – 1,45	1,30 – 1,50

Legenda: NR = não recomendável

Os principais fatores que atuam na severidade das condições de instalação são a forma e as dimensões dos grãos do material de aterro. Rainey e Barksdale (1993) afirmam que a espessura da camada e a energia de compactação são fatores importantes quando o solo possui partículas angulosas e de grandes dimensões. No caso de solos finos, estes fatores não influenciam significativamente a magnitude do dano mecânico.

Segundo Azambuja (1994), o dano mecânico pode provocar a ruptura de um certo número de filamentos, mas o comportamento mecânico depende da repercussão e do posicionamento das lesões. A gravidade das lesões deve ser entendida como um fenômeno mais amplo, para o qual contribuem o intertravamento disponível entre os fios que compõem os elementos da malha e as tensões atuantes na amostra.

10.3.

Ensaio de Tração Simples: Amostras Danificadas Artificialmente

Os ensaios em amostras danificadas naturalmente, apresentados no item 9.2, demonstraram que os métodos de compactação utilizados não causaram danos consideráveis nas amostras compactadas sob solos mais finos (argila e areia). Optou-se então, por executar ensaios de tração simples também em amostras com danos intensos, ou seja, com a ruptura de elementos da malha.

A ruptura dos elementos foi imposta artificialmente, utilizando-se uma tesoura especial, capaz de cortar materiais rígidos. Foram então executados ensaios de tração simples e obtidos os fatores de redução $f_d=f_2$, sob condições não confinadas.

Os ensaios de tração simples em amostras danificadas artificialmente foram executados apenas com a geogrelha MacGrid e com a Malha Metálica. A geogrelha ParaGrid apresenta elevada rigidez e dificilmente os procedimentos de compactação no campo resultariam na ruptura de um elemento longitudinal. Em relação aos elementos transversais, observou-se que a ruptura destes elementos não ocasiona perda significativa de resistência. Os elementos transversais desta geogrelha funcionam apenas como elementos de união e posicionamento das tiras longitudinais.

Com a geogrelha MacGrid, foram executados 2 grupos distintos de ensaio. O primeiro grupo consiste na execução de ensaios de tração simples em três amostras que tiveram um elemento longitudinal danificado (cortado). No segundo grupo, o dano consistiu na ruptura de um elemento transversal.

A Tabela 42 apresenta os resultados destes ensaios. É importante lembrar que o fator f_2 é definido como a razão entre as resistências à tração simples das amostras intacta e danificada. Na Figura 183 estão apresentadas as curvas típicas médias, dos 2 grupos de ensaios de tração simples executados com amostras de geogrelha MacGrid.

Os resultados demonstram que a ruptura de um elemento longitudinal provocou uma redução de resistência de aproximadamente 22%, correspondendo a um fator de redução $f_2=1,27$. Os elementos longitudinais das geogrelhas são responsáveis pela transferência da carga de tração ao longo da grelha. É de se esperar portanto, que a ruptura de um destes elementos conduza a uma perda significativa de resistência. Quando ocorre a ruptura de um elemento transversal, observa-se apenas uma variação pequena de resistência. Em solicitações de tração simples, os elementos transversais são responsáveis

apenas pelo posicionamento e pela configuração da malha. No entanto, em solicitações de arrancamento, estes elementos são responsáveis pela ancoragem da geogrelha na massa de solo (item 9.4).

A Figura 184 apresenta a configuração deformada de 2 geogrelhas MacGrid ao término dos ensaios de tração simples e a localização das garras superior e inferior. Nota-se que a ruptura da malha ocorreu sempre na região das garras.

Tabela 42 - Ensaios de Tração Simples: MacGrid Danificada Artificialmente

Elemento Rompido	Resistência à Tração (kN/m)	Média	f_2
longitudinal	74,0	72,8	1,27
	72,0		
	72,5		
transversal	80,0	83,5	1,05
	84,0		
	86,5		

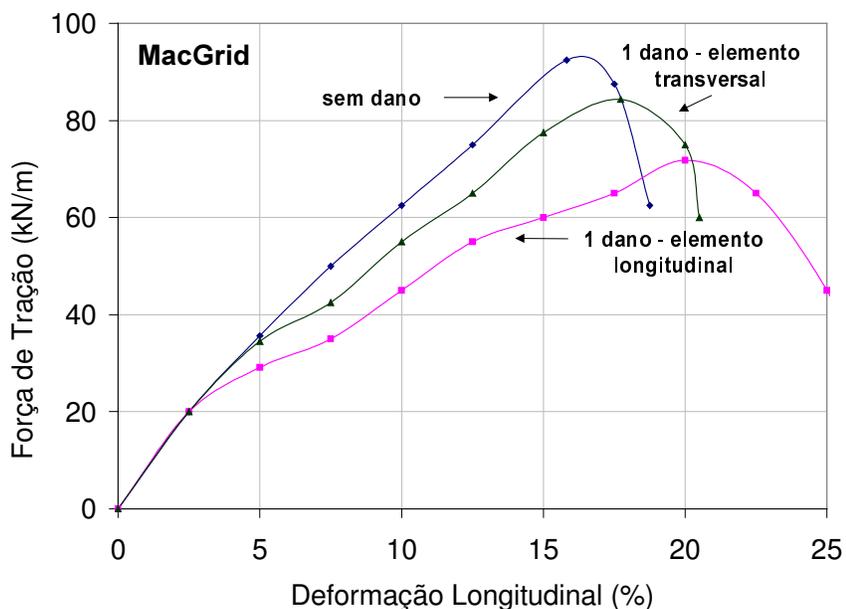


Figura 183 - Ensaios de Tração Simples em Amostras Danificadas Artificialmente: MacGrid

Com a Malha Metálica, foram executados ensaios de tração simples em amostras com 1 e 3 elementos danificados. Uma vez posicionada a geogrelha no equipamento de tração simples, rompia-se os elementos com uma tesoura especial (Figura 185). A localização dos elementos danificados está apresentada no Capítulo 6 (Figura 73).

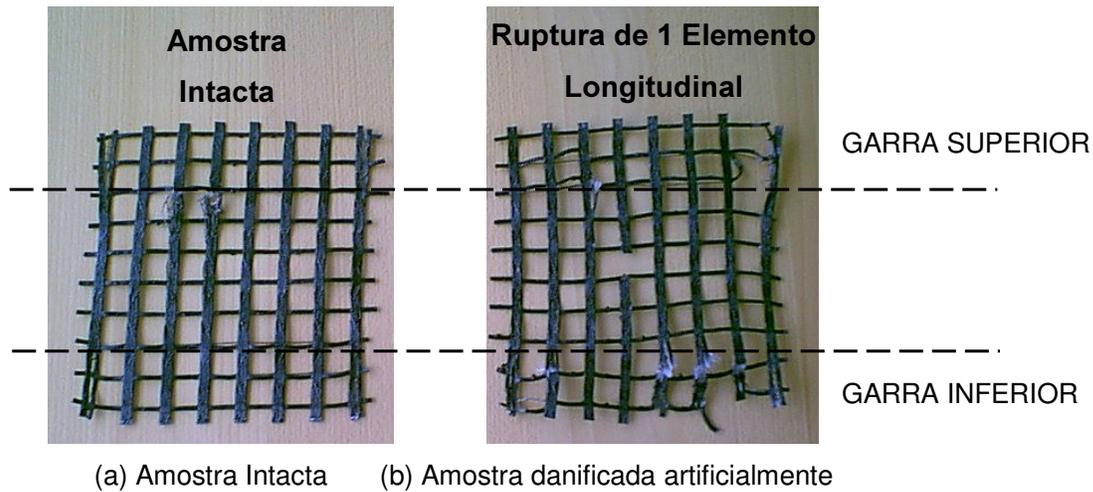


Figura 184 - Geogrelha MacGrid ao Término dos Ensaios de Tração Simples



Figura 185 - Execução do Dano Artificial na Malha Metálica

A Figura 186 apresenta uma comparação entre os resultados dos ensaios com as amostras danificadas artificialmente e com a amostra intacta. Os resultados foram, de certa forma, surpreendentes, pois as amostras danificadas

apresentaram resistência superior à da amostra intacta. Estes ensaios foram repetidos 5 vezes, de forma a garantir a confiabilidade dos resultados sobre o ganho inesperado de resistência com o dano.

Pela Figura 186, observa-se que os resultados dos ensaios de tração simples são praticamente coincidentes até as proximidades da ruptura. A amostra não danificada rompeu para um valor inferior de força de tração. Nas amostras danificadas, ocorreu o alargamento do dano e os elementos tenderam a se juntar, dificultando a ruptura da geogrelha na garra. O entrelaçamento dos arames da malha à dupla torção impede a propagação de desfiamentos em caso de ruptura de um ou mais fios da malha. A Figura 187 ilustra as malhas após a ruptura.

Agostini et al (1988) também executaram ensaios de tração simples em amostras de Malha Metálica danificada. O dano consistiu na ruptura mecânica de um elemento central da malha. Os resultados mostraram que o dano central não produz perda de resistência. No caso de ensaios executados com malha metálica com entrelaçamento dos arames feito por torção simples, uma perda de resistência de 30% foi observada. Estes resultados demonstram que a dupla torção impede o desmalhamento e a conseqüente redução da resistência da malha metálica.

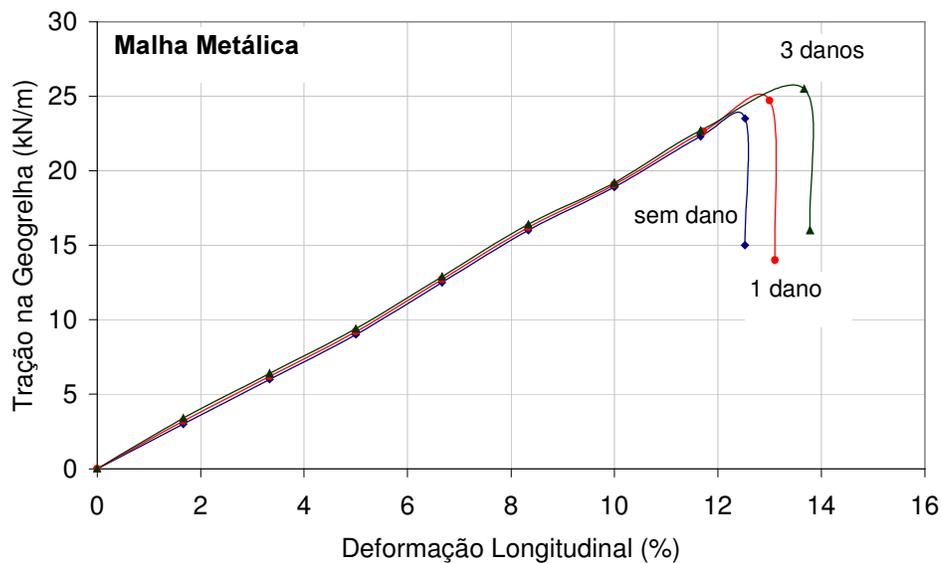


Figura 186 - Ensaios de Tração Simples em Amostras Danificadas Artificialmente: Malha Metálica



(a) Amostra sem dano

(b) Amostra com 3 danos artificiais

Figura 187 - Malhas Metálicas Após Ruptura em Ensaios de Tração Simples

10.4.

Ensaios de Arrancamento: Amostras Danificadas Artificialmente

Em geral, os fatores de redução têm sido definidos a partir de ensaios de tração simples, ou seja, sob condições não confinadas. No entanto, nas solicitações de campo, as geogrelhas encontram-se imersas na massa de solo. Desta forma, existem outras variáveis afetando a extensão do dano, como a tensão de confinamento, o tipo e a densidade relativa do solo e a contribuição dos elementos transversais.

Os ensaios confinados reproduzem melhor as condições reais de operação de geogrelhas em maciços de solo reforçado. A variação das propriedades mecânicas medidas através deste procedimento proporciona portanto, uma avaliação mais adequada dos fatores de redução por dano mecânico.

Uma série de ensaios de arrancamento foi executada em amostras danificadas artificialmente da Malha Metálica e da geogrelha MacGrid, embutidas em solo arenoso e em solo silto-argiloso. Geogrelhas com diferentes configurações e posições de danos foram ensaiadas (Tabela 43). A Figura 188

apresenta esquematicamente a localização dos elementos danificados artificialmente nos 2 tipos de geogrelhas.

Os ensaios com areia foram executados para 2 diferentes densidades relativas: 30 e 80%. A Tabela 43 apresenta os resultados dos ensaios e os correspondentes fatores de redução ($f_d=f_3$). Este fator f_3 foi obtido a partir da razão entre a resistência ao arrancamento da amostra intacta e a resistência ao arrancamento da amostra danificada.

Tabela 43 - Ensaio de Arrancamento: Amostras Danificadas Artificialmente

GEOGRELHA	Ensaio Nº	SOLO	D_R ou GC (%)	Nº de danos	Danos	P_{ult} (kN/m)	f_3
Malha Metálica	A1	Areia	30	0	_____	31,1	_____
	A2			1	_____	29,2	1,06
	A3			3	A, B, C	26,0	1,20
	A4			3	D, B, E	37,7	0,82
	A5	Areia	80	0	_____	44,2	_____
	A6			1	_____	33,9	1,30
	A7			3	A, B, C	32,7	1,35
MacGrid	A8	Areia	80	0	_____	65,1	_____
	A9			3	B, C, D	49,0	1,32
	A10			5	A, B, C, D, E	38,2	1,70
	A11			3	G, H, I	55,8	1,16
	A12			5	F, G, H, I, J	41,9	1,55
	A13	Silte argiloso	100	0	_____	51,5	_____
	A14			3	B, C, D	44,1	1,17
	A15			5	A, B, C, D, E	42,7	1,20

Na Figura 189 estão apresentados os resultados dos ensaios realizados com a Malha Metálica em solo arenoso, com densidade relativa de 30%. Os três ensaios foram executados sob um nível de confinamento de 25kPa. Na amostra com 1 dano, o elemento rompido estava localizado exatamente no centro da amostra. Na amostra com 3 danos, os elementos danificados encontravam-se distribuídos ao longo da linha central, no sentido do arrancamento, como indicado na Figura 188. O Capítulo 6 apresenta detalhes sobre a distribuição dos danos.

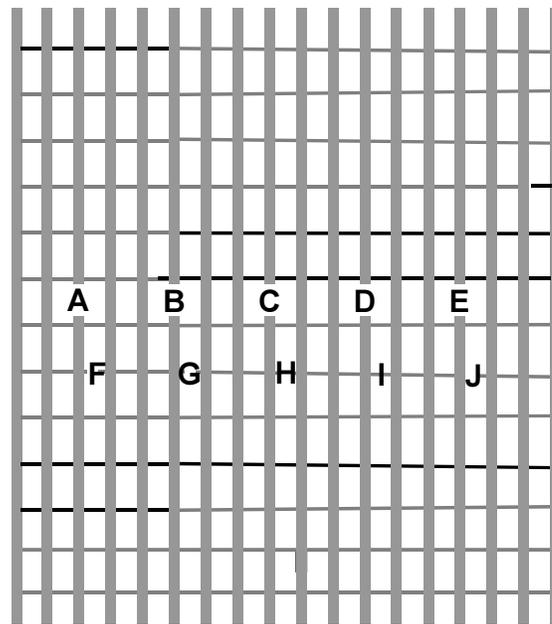
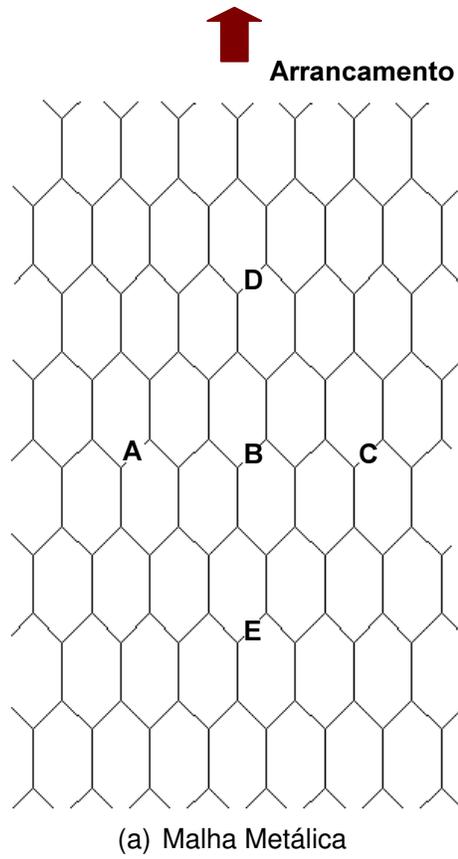


Figura 188- Localização dos Elementos Danificados Artificialmente em Ensaios de Arrancamento

Observa-se que a resistência ao arrancamento diminui com o número de elementos danificados. No ensaio A3 (com 3 danos), observou-se a ruptura brusca por tração da malha, quando a carga de arrancamento atingiu 26kN/m. Enquanto a malha danificada encontrava-se na região confinada, ela era arrancada da massa de solo. No entanto, quando o dano surgiu na região não confinada, a malha rompeu bruscamente por tração. Comportamento semelhante foi reportado por Lopes (2000b), a partir de ensaios de arrancamento com geogrelhas previamente danificadas imersas em solo arenoso. Geogrelhas com danos intensos romperam por tração da malha.

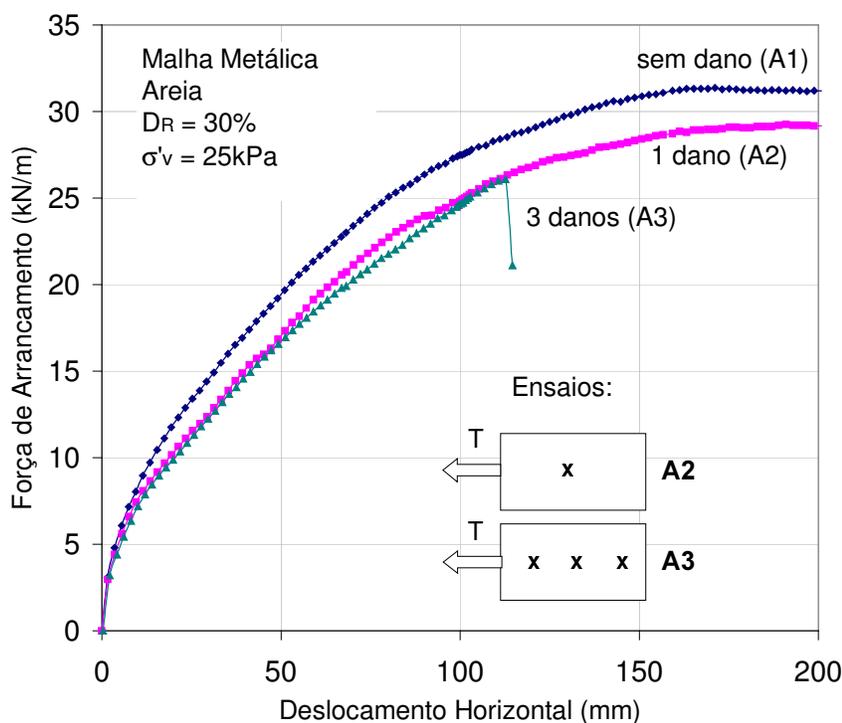
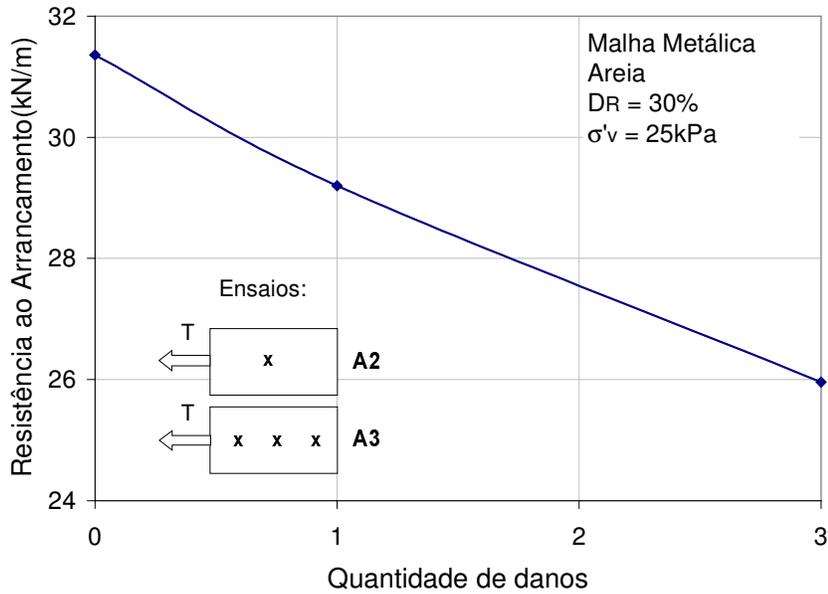


Figura 189 - Ensaio de Arrancamento em Areia ($D_R=30\%$): Malha Metálica com Danos no Sentido Longitudinal

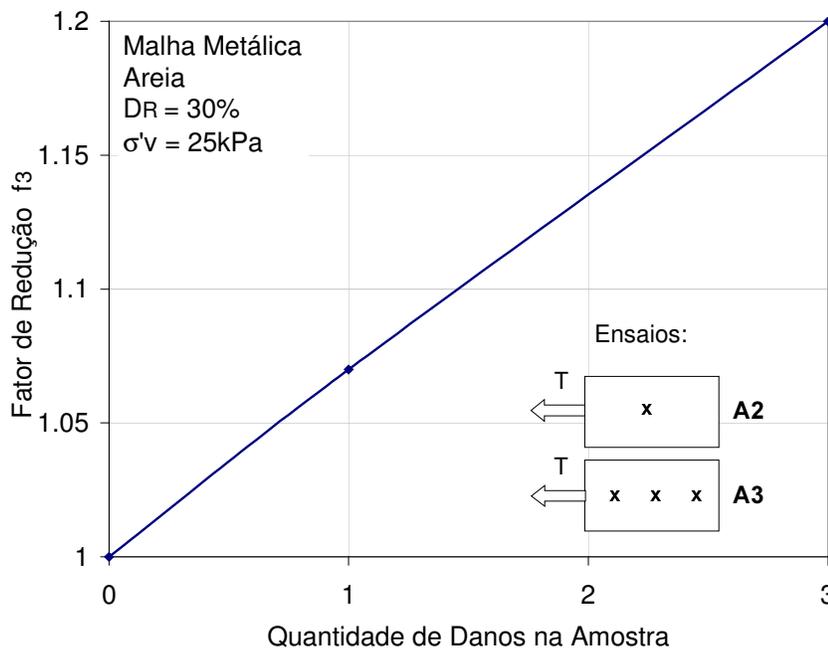
A Figura 190 apresenta as variações da resistência ao arrancamento e do fator de redução com a quantidade de danos. Nota-se que a resistência diminui com o número de elementos danificados. Como consequência, o fator de redução f_3 aumenta.

A seguir, foi executado um ensaio com a Malha Metálica em areia, sob as mesmas condições de confinamento e densidade relativa, variando-se a configuração do dano. Neste ensaio, o dano consistiu na ruptura de 3 elementos,

na região central, no sentido transversal ao arrancamento. A Figura 191 apresenta os resultados obtidos, em comparação com o ensaio executado com a amostra intacta e com a amostra que possui 1 dano no centro.



(a) Resistência ao Arrancamento



(b) Fator de Redução f_3

Figura 190 - Influência do Dano Artificial no Sentido Longitudinal: Malha Metálica

Nota-se que, no ensaio com 3 elementos danificados na direção transversal, a resistência ao arrancamento é superior à resistência da amostra intacta. Este resultado, aparentemente incoerente, pode ser justificado pela ancoragem do elemento danificado na massa de solo. Ou seja, como a massa de solo encontra-se no estado fofo, o arame rompido pode ter penetrado no solo, gerando uma resistência adicional durante o arrancamento.

A Figura 192 ilustra o detalhe do dano na Malha Metálica ao término dos ensaios de arrancamento. É razoável supor que os arames soltos (rompidos) podem contribuir na ancoragem da malha com o solo envolvente. Neste caso, faz-se necessário um esforço adicional para provocar o arrancamento.

Cabe ressaltar, que apesar de ter apresentado uma resistência ao arrancamento maior, seria inadmissível sugerir que a ocorrência do dano seja favorável. A geogrelha danificada fica mais susceptível a danos ambientais e ataques químicos, comprometendo a sua vida útil.

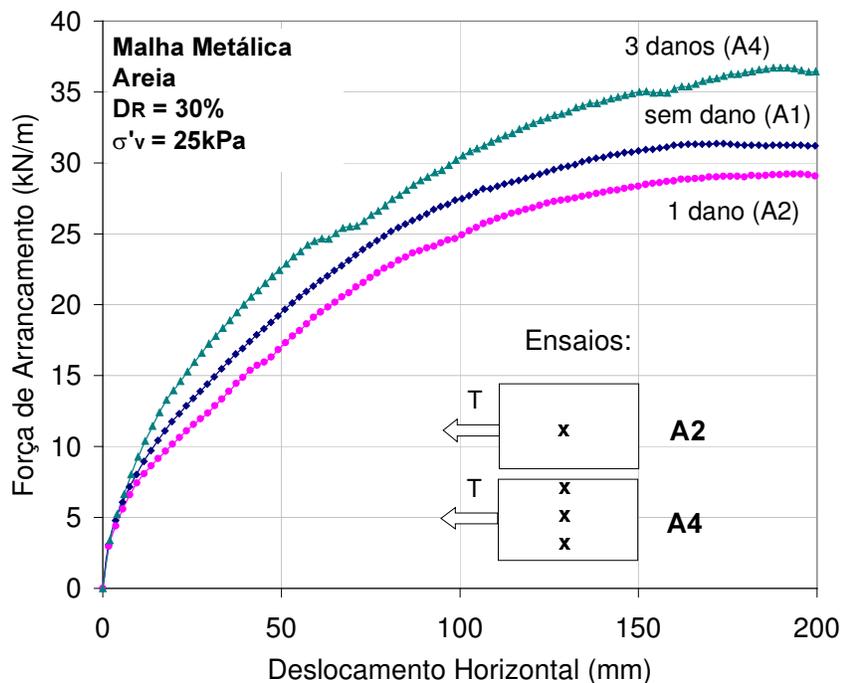


Figura 191 - Ensaio de Arrancamento em Areia ($D_R=30\%$): Malha Metálica com Danos no Sentido Transversal ao Arrancamento

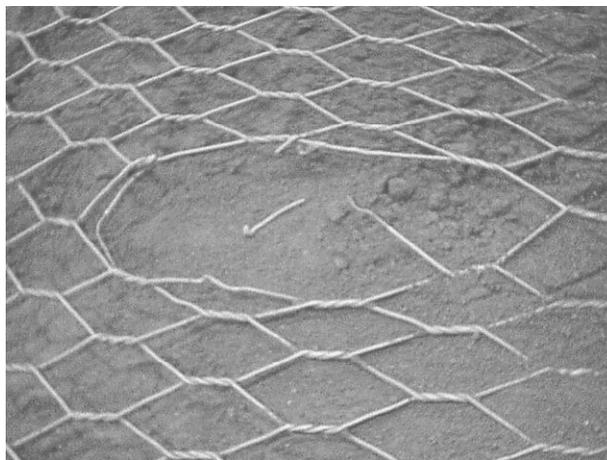


Figura 192 - Detalhe do Dano ao Término dos Ensaios

Ensaios de arrancamento foram também executados com a Malha Metálica danificada em areia densa ($D_R=80\%$) e estão apresentados na Figura 193. Nestes ensaios, as amostras apresentavam danos posicionados no sentido longitudinal do arrancamento e sofreram ruptura por tração da malha. No entanto, observa-se que esta ruptura ocorreu para diferentes valores de força de arrancamento. Nota-se que a resistência ao arrancamento diminuiu com o aumento do número de lesões da malha.

Uma comparação entre os resultados dos ensaios com a Malha Metálica sob diferentes densidades relativas demonstra que, para a mesma configuração do dano (1 dano no centro da amostra), o fator de redução f_3 é maior para o solo denso. Em estado fofo, a Malha é arrancada mais facilmente da massa de solo. Sendo assim, a influência do dano na resistência ao arrancamento é menos significativa. Os resultados sugerem que, quanto maior a densidade relativa do solo, maior a influência do dano em solicitações de arrancamento da geogrelha.

Lopes (2000b) realizou uma série de ensaios de arrancamento em amostras de geogrelha previamente danificadas, sob diferentes níveis de confinamento. O dano foi induzido através da ruptura de elementos da malha e 9 configurações distintas de dano foram consideradas. Quando a amostra apresentava danos leves, ocorreu a ruptura por arrancamento da geogrelha da massa de solo. No caso de amostras fortemente danificadas, a geogrelha rompeu por tração em algum ponto da malha. Os resultados indicavam também, que o fator de dano (f_3) aumenta com o aumento da tensão confinante.

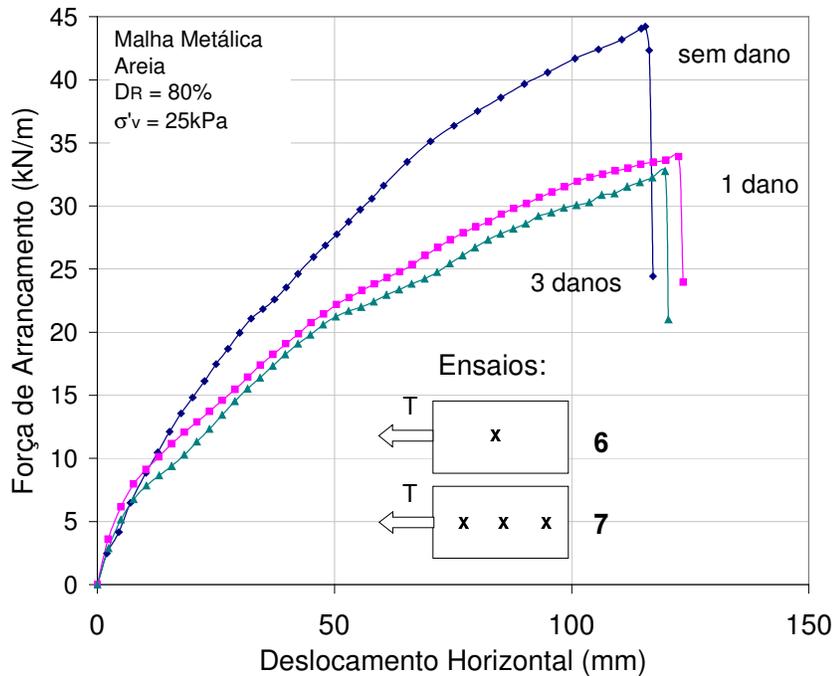


Figura 193 - Ensaio de Arrancamento em Areia (DR=80%): Malha Metálica com Danos no Sentido Longitudinal

No capítulo 7, verificou-se que a densidade relativa do solo e a tensão confinante exercem o mesmo tipo de influência na resistência ao arrancamento de geogrelhas não danificadas. Os ensaios de arrancamento em amostras danificadas sugerem que um aumento da densidade relativa conduz a um aumento do fator de redução f_3 . Ou seja, quanto maior a densidade relativa e/ou o confinamento, maior a influência do dano na resposta ao arrancamento.

No caso da geogrelha MacGrid, foram executados ensaios com 3 e 5 elementos danificados. O aumento do número de danos está relacionado à configuração da malha. Esta geogrelha apresenta pequenas aberturas (20mm de lado) e, a partir de um ensaio preliminar (Capítulo 6), observou-se que a ruptura de apenas 1 elemento não afeta de forma significativa os resultados. Optou-se então, por danificar mais elementos, buscando-se uma variação mais acentuada. Os danos foram executados nas tiras longitudinal central e transversal central.

A Figura 194 apresenta os resultados dos ensaios em areia densa ($D_R=80\%$), com os danos ao longo da tira longitudinal. Pode-se observar que a resistência ao arrancamento diminuiu significativamente com o aumento do número de elementos danificados. Deve-se levar em consideração que, nestes ensaios, a geogrelha é arrancada, deixando o dano exposto. Na região não

confinada, observou-se um aumento progressivo da dimensão do dano na direção longitudinal e, em consequência, uma redução da rigidez da geogrelha.

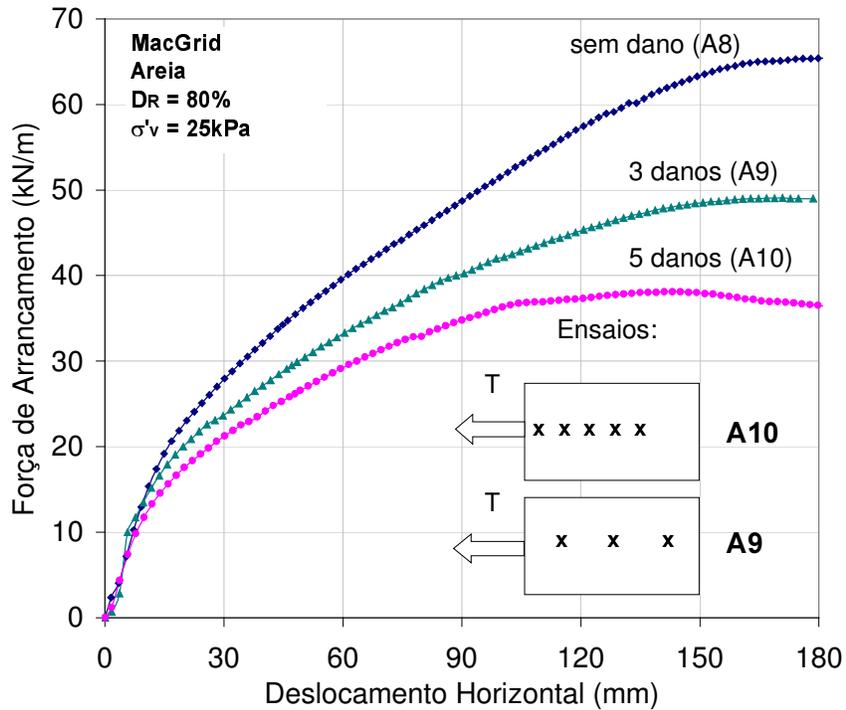
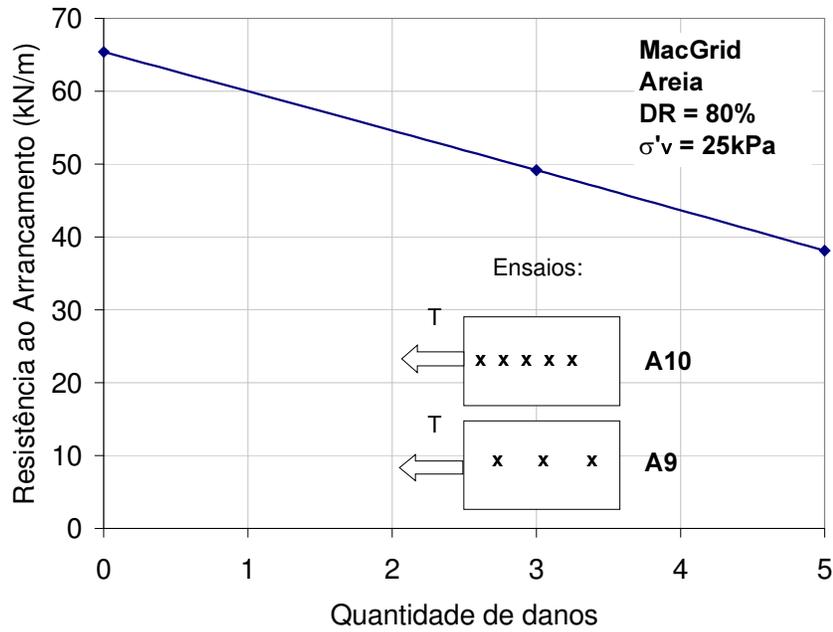


Figura 194 - Ensaio de Arrancamento em Areia ($D_R=80\%$): MacGrid com Danos na Tira Longitudinal, no Sentido do Arrancamento

Na Figura 195, estão plotadas as variações da força de arrancamento máxima e do fator de redução com a quantidade de elementos danificados. Nota-se que a resistência ao arrancamento decresceu linearmente com o aumento da quantidade de danos. Em consequência, o fator de redução aumentou significativamente, atingindo um valor de 1,7 quando a amostra apresentava 5 elementos rompidos na tira longitudinal central.



(a) Resistência ao Arrancamento

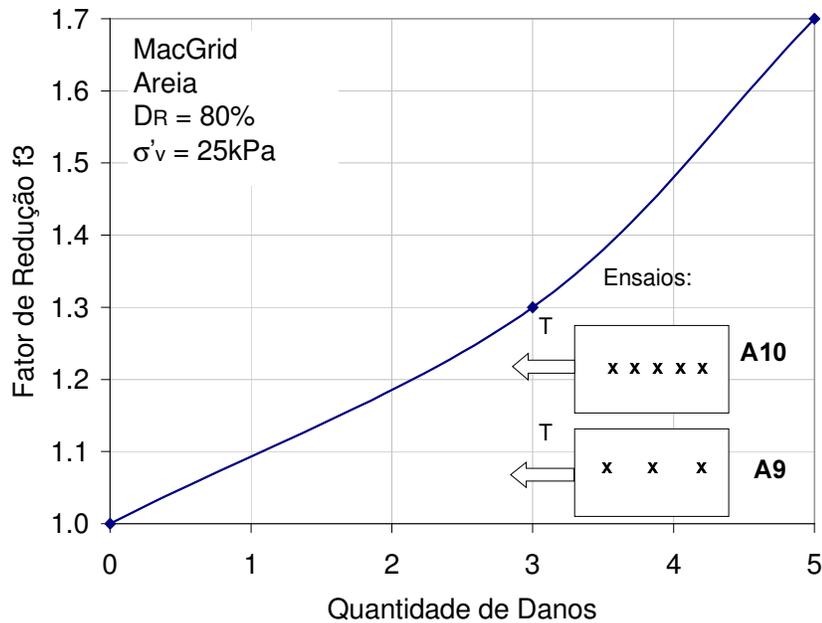
(b) Fator de Redução f_3

Figura 195 - Influência do Dano Artificial no Sentido Longitudinal : MacGrid

Nos ensaios executados com a MacGrid danificada embutida em solo silto-argiloso (Figura 196), o mesmo tipo de comportamento foi observado. A resistência ao arrancamento diminuiu com o aumento do número de lesões. No entanto, essa redução foi menos acentuada do que nos ensaios em areia. Com 5

danos, o fator de redução obtido foi de 1,20. Provavelmente, essa redução menos acentuada está relacionada à maior facilidade de deslizamento entre a geogrelha e o solo silte-argiloso. Os resultados sugerem que, quanto menor for a aderência entre a geogrelha e o solo envolvente, menor será a influência do dano na resposta ao arrancamento.

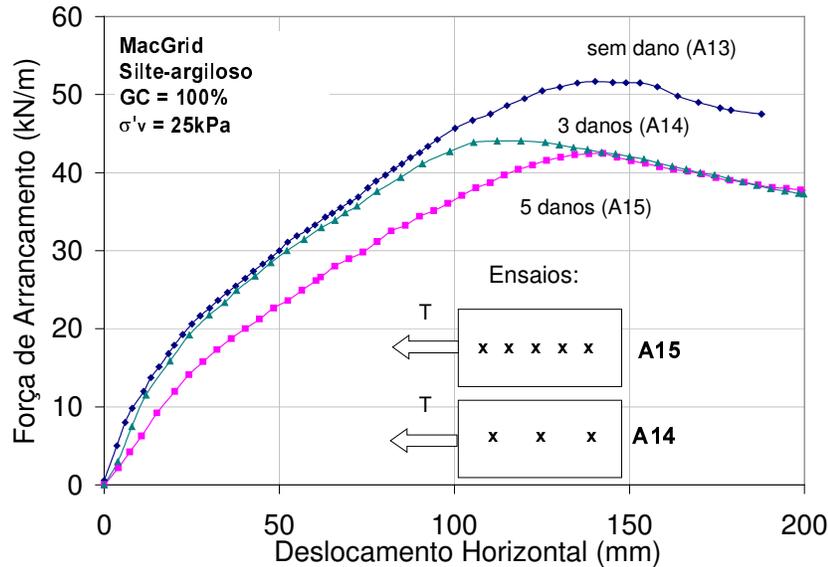


Figura 196 - Ensaio de Arrancamento em Silte Argiloso: Macgrid com Danos na Tira Longitudinal, no Sentido do Arrancamento

Os ensaios executados com geogrelhas que apresentavam dano na tira transversal central estão apresentados na Figura 197. Pode-se verificar que houve uma perda significativa de resistência com o aumento do número de danos na tira transversal, contrariamente ao verificado nos ensaios de tração simples. Essa perda de resistência está relacionada à redução da parcela de contribuição do empuxo passivo dos elementos transversais. Como mencionado no Capítulo 7, esta parcela é proporcional ao número de elementos transversais:

$$P_p = \left(\frac{L}{S}\right) \sigma'_p \cdot \alpha_p \cdot B \cdot e \quad (99)$$

onde: P_p = parcela da resistência da interface solo-geogrelha correspondente à mobilização do empuxo passivo dos elementos transversais;

B e L = largura e comprimento da geogrelha;

S = distância entre elementos transversais;

α_p = fração da largura da geogrelha disponível para mobilização da resistência passiva;

e = espessura dos elementos transversais da geogrelha;

σ'_p = tensão passiva atuante nos elementos transversais.

A razão (L/S) equivale ao número de elementos transversais da geogrelha.

Como comentado anteriormente, nos ensaios de tração simples, os elementos transversais são responsáveis basicamente pelo posicionamento e pela configuração da geogrelha. No entanto, nas solicitações de arrancamento, estes elementos são responsáveis também pela ancoragem da geogrelha na massa de solo. No Capítulo 7, verificou-se que a geogrelha MacGrid apresentava uma elevada parcela de resistência devido à contribuição dos elementos transversais, fato que justificava esse comportamento durante os ensaios de arrancamento com geogrelhas danificadas artificialmente.

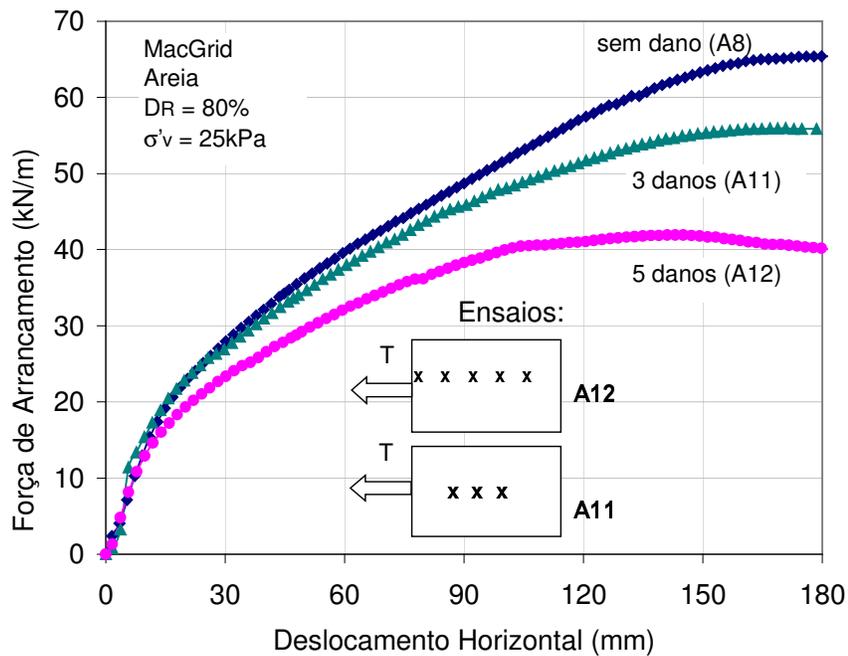


Figura 197 - Ensaio de Arrancamento em Areia: Macgrid com Danos na Tira Transversal, no Sentido do Arrancamento.

10.5. Susceptibilidade ao Dano em Solicitações de Arrancamento

A partir dos resultados dos ensaios de arrancamento em amostras danificadas artificialmente, pode-se avaliar a susceptibilidade das geogrelhas ao dano. Optou-se por definir um índice de susceptibilidade S , que pode ser obtido pela declividade da curva fator de redução (f_3) vs número de elementos danificados. Este índice fornece o valor médio da redução da resistência ao arrancamento por elemento danificado.

O índice S é obtido a partir da expressão:

$$S = \left(\frac{\Delta f_3}{\Delta n} \right) \times 100\% \quad (100)$$

onde: Δf_3 = variação do fator de redução;

Δn = variação do número de elementos danificados.

Quanto maior for o valor de S , mais susceptível é a geogrelha à perda de resistência com o dano induzido. O índice de susceptibilidade indica a influência do dano na resposta ao arrancamento.

A Figura 198 apresenta a variação da resistência ao arrancamento normalizada em função do número de elementos danificados artificialmente, para a Malha Metálica embutida em solo arenoso, com diferentes valores de densidade relativa.

Observa-se que a perda de resistência foi aproximadamente linear com o número de elementos danificados. Um índice de susceptibilidade igual a 5,4% foi obtido para a areia fofa e igual a 8,7%, para a areia densa. A perda de resistência foi, portanto, mais acentuada para maiores valores de densidades relativas.

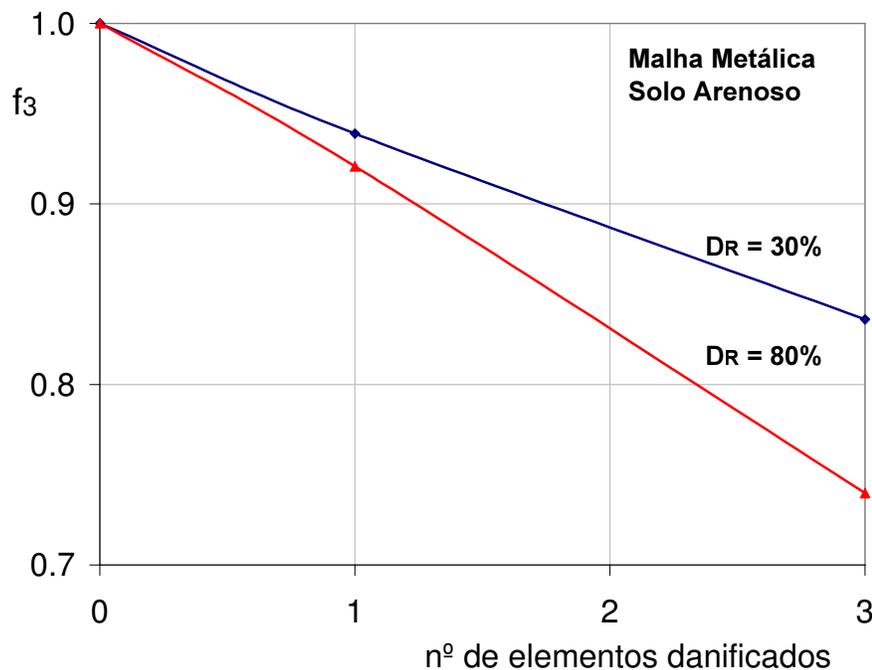


Figura 198 - Susceptibilidade ao Dano: Malha Metálica Embutida em Solo Arenoso

A Figura 199 apresenta a influência do dano no arrancamento da geogrelha MacGrid em diferentes tipos de solo. Observa-se que, em solo arenoso, a perda de resistência foi também aproximadamente linear com o dano. Nota-se que a influência do número de elementos danificados é bastante acentuada no arrancamento da geogrelha MacGrid em areia. O índice de susceptibilidade é igual a 8,3%. Em silte argiloso, o comportamento linear não foi observado. A geogrelha MacGrid apresenta uma perda de resistência de 15% quando o dano consiste na ruptura de 3 elementos longitudinais e 17% quando são rompidos 5 elementos.

A Figura 200 apresenta uma comparação entre o comportamento de ambos os tipos de geogrelha em areia, em função do número de elementos danificados artificialmente. É interessante notar que a susceptibilidade de ambas as geogrelhas ao dano foi semelhante. A Malha Metálica apresentou um índice de susceptibilidade de 8,7%, enquanto a MacGrid apresentou S igual a 8,3%.

Ressalta-se que as geogrelhas ensaiadas apresentavam diferentes características físicas e mecânicas. A influência do dano deve ser avaliada não somente em função das propriedades obtidas a partir de ensaios não confinados. A análise deve considerar, também, o mecanismo de interação da geogrelha com o solo envolvente.

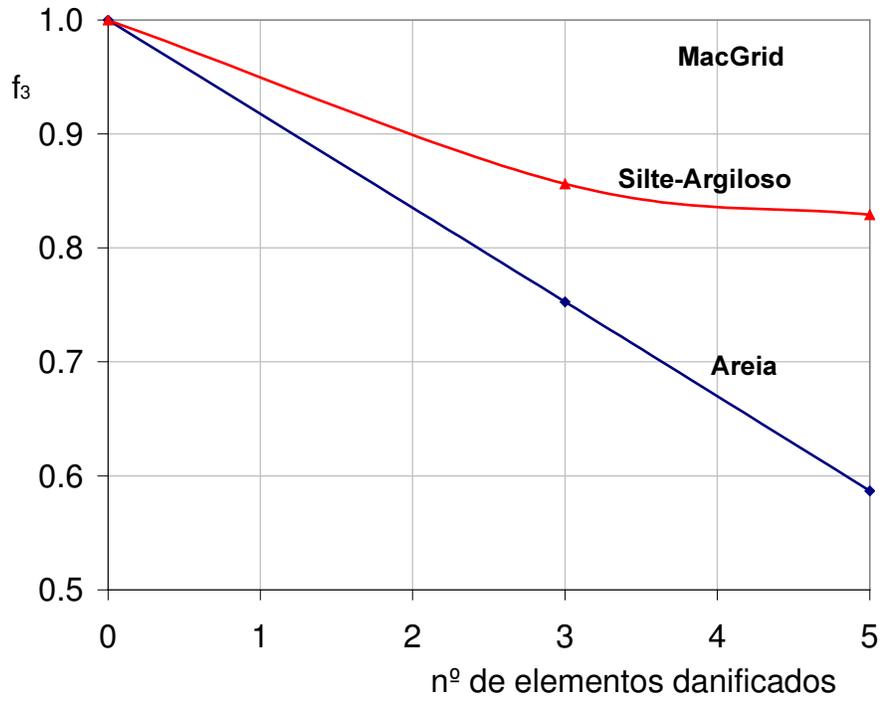


Figura 199 - Susceptibilidade ao Dano: MacGrid Embutida em Areia e em Silte Argiloso

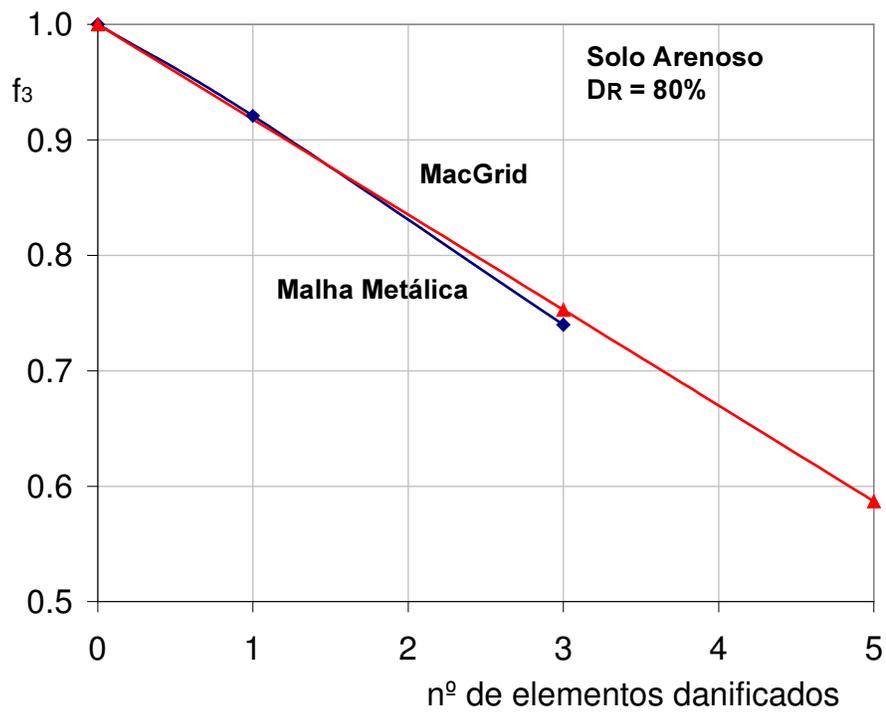


Figura 200 - Susceptibilidade ao Dano das Geogrelhas MH e MG Embutidas em Areia

10.6. Ensaio de Cisalhamento Direto: Amostras Danificadas Artificialmente

Ensaio de cisalhamento direto em amostras danificadas artificialmente foram executados com o objetivo de investigar a influência do dano quando a superfície de ruptura intercepta o material de reforço. Neste caso, a geogrelha é tracionada conferindo ao solo uma resistência à tração. Para tanto, foram executados ensaios de cisalhamento direto com geogrelhas danificadas, posicionadas verticalmente na caixa de cisalhamento.

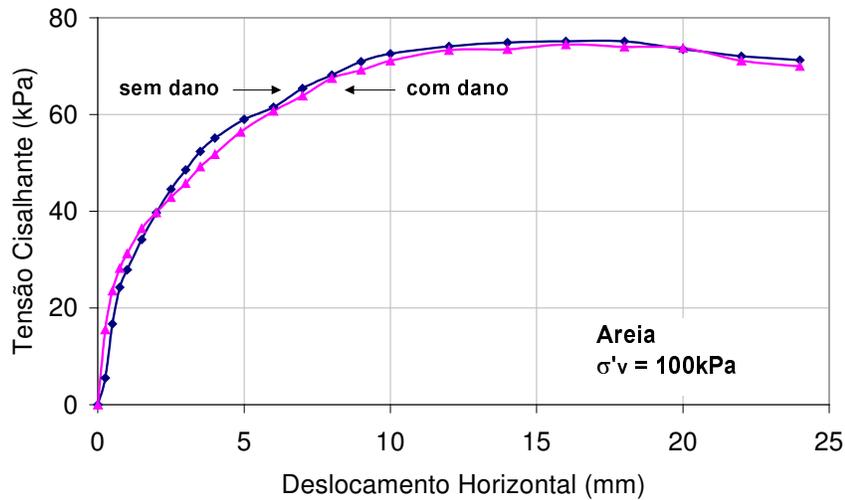
Estes ensaios foram executados no equipamento de 30cm x 30cm, sob um nível de confinamento de 100kPa, em solo arenoso e em solo silto-argiloso. A geogrelha utilizada foi a MacGrid, por ser a única que atende às especificações da norma. Segundo a ASTM D5321, a dimensão mínima da caixa deve ser 5 vezes maior que a abertura máxima da geogrelha ensaiada.

O dano foi executado no centro da amostra, na tira longitudinal. A geogrelha foi posicionada verticalmente na caixa de cisalhamento. O solo arenoso foi preparado com um teor de umidade de 10% e uma densidade relativa de 80%. O silte argiloso foi compactado na umidade ótima, atingindo-se um grau de compactação de 100%.

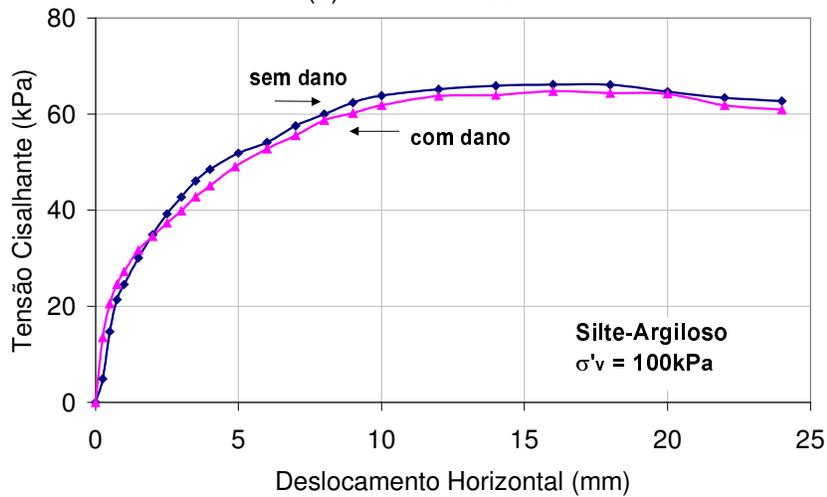
A Figura 201 apresenta uma comparação entre os resultados dos ensaios com a amostra intacta e com a amostra danificada, em solo arenoso e em solo silto-argiloso, sob um confinamento de 100kPa. Pode-se observar que não houve perda de resistência com o dano induzido. Neste caso, o fator de redução $f_d=f_4$ obtido foi igual a 1,0.

Esta constatação pode ser explicada com base na Figura 183. Verifica-se que até um nível de deformação de 3%, as curvas da amostra intacta e da amostra com 1 dano no elemento longitudinal são coincidentes. Nos ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado, a geogrelha trabalha à tração. Dependendo do nível de deformação longitudinal da geogrelha, induzido pela deformação cisalhante, a parcela de resistência à tração mobilizada durante o ensaio pode não ser afetada pelo dano. O esforço de tração atuante na geogrelha para uma deformação longitudinal de 3% é de 24kN/m.

Os resultados sugerem que em situações onde a superfície de ruptura é perpendicular à geogrelha, a ocorrência de eventuais danos não deve comprometer a integridade do maciço reforçado. Na prática, este tipo de situação ocorre nas camadas de geogrelhas localizadas no topo dos maciços reforçados, onde a superfície de ruptura é aproximadamente vertical.



(a) Solo Arenoso



(b) Solo Silto-Argiloso

Figura 201 - Ensaio de Cisalhamento Direto em Amostras Danificadas Artificialmente

10.7.

Considerações Finais

Os ensaios apresentados no presente Capítulo objetivaram o estudo da influência do dano no comportamento de geogrelhas. Os três tipos de geogrelha utilizados no programa experimental foram submetidos a ensaios de tração simples, ensaios de arrancamento e ensaios de cisalhamento direto. Dois tipos distintos de dano foram induzidos: o dano natural, decorrente de processos de compactação, e o dano artificial, obtido a partir da ruptura física de elementos da malha.

A partir dos ensaios de tração simples, procurou-se avaliar a alteração das propriedades mecânicas com o dano. Os ensaios de arrancamento e cisalhamento direto objetivaram a avaliação da influência do dano no mecanismo de interação solo-geogrelha.

Como principais conclusões, ressalta-se que o dano natural é mais acentuado quando se utilizam solos de granulometria mais grosseira e métodos de compactação mais agressivos.

A geogrelha MacGrid demonstrou ser a mais susceptível a danos de compactação. As lesões da geogrelha ParaGrid e da Malha Metálica restringiram-se apenas à ruptura da proteção de PVC. Dessa forma, não foi verificada perda de resistência a curto prazo. No entanto, a ruptura do revestimento pode causar uma perda de resistência a longo prazo, uma vez que os filamentos do núcleo ficam expostos às intempéries.

Um índice de susceptibilidade (S) foi definido para permitir a avaliação da influência do dano artificial na resposta ao arrancamento de geogrelhas. Este índice é obtido a partir da declividade da curva resistência ao arrancamento normalizada vs número de elementos danificados.

As geogrelhas MacGrid e Metálica, apesar de possuírem características físicas e mecânicas distintas, apresentam índices de susceptibilidade aproximadamente iguais. Este fato demonstra a necessidade de avaliação do dano sob condições confinadas.

Em solicitações de arrancamento, observa-se que a influência do dano na resposta ao arrancamento aumenta com a densidade relativa do solo.

Em solos mais finos, a influência do dano artificial não é tão significativa. As geogrelhas imersas em areia são mais susceptíveis à perda de resistência com o dano do que quando imersas em silte argiloso.

Em solicitações de cisalhamento direto, os resultados sugerem que, em situações onde a superfície de ruptura é perpendicular à geogrelha, a ocorrência de eventuais danos não deve comprometer a integridade do maciço reforçado. Este tipo de situação ocorre usualmente nas camadas superiores dos maciços reforçados.